文章编号： 1007-4627(2024) 01-0040-08

HIAF-BRing 四极铁钛合金内衬真空管道宽带阻抗研究

杜韶晖[1,2]，杨建成[1,2]，刘 杰[1,2]，朱光宇[1,2]，谢文君[1,2]，申国栋[1,2]

(1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 中国科学院大学核科学技术学院，北京 100049)

摘要：超薄壁钛合金内衬不锈钢真空管道以其结构强度高，横向孔径小，适合于极高真空环境，在快上升磁场中的涡流效应处于可接受范围内，与其他类型的磁场快变化磁铁的真空管道相比成本较低等原因，已经成为 HIAF-BRing 二极磁铁和四极磁铁真空管道方案的首选。二极铁和四极铁钛合金内衬真空管道是 BRing 中重要的束流耦合阻抗源。其中，四极铁钛合金内衬的阻抗及其减小措施尚未研究过。在模拟软件 CST studio suite 中使用传输线法和尾场法分别对各种规格的四极铁钛合金内衬真空管道进行模拟，模拟结果表明 1—500 MHz 频段内钛合金内衬真空管道主要引入宽带阻抗，且钛合金内衬内表面加薄板的阻抗减小措施同样适用于四极铁真空管道。利用模拟结果计算全环阻抗，发现在 10^6—$5\times10^8 Hz$ 频段内，钛合金内衬真空管道采取阻抗减小措施能将全环横向宽带阻抗虚部从 0.70 $M\Omega/m$(水平) 和 0.82 $M\Omega/m$(垂直) 减小到 0.33 $M\Omega/m$(水平) 和 0.43 $M\Omega/m$(垂直)，将此结果代入 DELPHI 中计算 $^{78}Kr^{19+}$ 单个束团在不同流强下的模式频率移动，发现 BRing 中 Kr 束发生横向模耦合不稳定性的流强阈值从 $2.7\times10^{11} ppp$ 提升到 4.4×10^{11} ppp。

关键词：BRing；四极铁真空管道；钛合金内衬；束流耦合阻抗；横向模耦合不稳定性

中图分类号：TL503.7 **文献标志码：**A **DOI：**10.11804/NuclPhysRev.37.01.40

引言

我国正在建设的强流重离子加速器（The High Intensity Heavy Ion Accelerator Facility）将成为研究核物理、原子物理、应用核技术的重要平台，其中增强器（Booster Ring）是确保束流达到高能量、高流强、高品质的关键设备[1]。BRing 上有 48 台二极磁铁和 78 台四极磁铁。为避免低能束流的空间电荷效应对流强提升的限制，束流需要很快加速到引出能量[2]。因此 BRing 要求二极铁磁场最大上升速率达 12 T/s，四极铁磁场的最大上升速率为 57 T/m/s[3]。

快变化的磁场可能会在磁铁真空管道内产生较强的涡流效应，引起管道变形，发热，破坏磁场的均匀性和同步性。如何将涡流效应降低到可接受的水平是国内外快循环同步加速器磁铁真空管道设计中都要面临的问题。中国散裂中子源 CSNS-RCS 环的二极磁铁和四极磁铁采用带直流偏置的 25 Hz 正弦交流励磁，为减小涡流效应，其二极磁铁和四极磁铁真空管道采用了陶瓷真空盒，并在管道外表面贴附纵向铜条做高频屏蔽[4]。但较长的陶瓷管道加工难度很大，还会引入较大的宽带阻抗。德国 FAIR 大科学装置的 SIS100 环二极铁的磁场上升速率达 4T/s，四极磁铁的磁场上升速率达 64 T/m/s[5]，其二极铁和四极铁真空管道采用了 0.3 mm 超薄壁不锈钢管道，外侧加上加强筋以保证必要的结构稳定性[6]。薄壁加筋的四极铁管道横向尺寸较大，需要增大磁铁的孔径，从而增加磁铁的建造和运行费用。HIAF 团队曾经提出 BRing 二极和四极磁铁采用 0.3 mm 超薄壁不锈钢管道，管道内侧用陶瓷环作支撑的方案。陶瓷环表面镀金膜来减小束流耦合阻抗[7-8]。在陶瓷环基础上，HIAF 团队进一步提出了 3D 打印钛合金环做超薄壁不锈钢管道内衬的新方案。与陶瓷环相比，3D 打印钛合金环具有更高的结构强度，因此在相同的束流包络下，真空管道可以有更小的孔径，可以进一步降低磁铁的建造和运行费用[9]。但是与陶瓷环内衬一样，钛合金环内衬也会引入宽带阻抗，影响束流的稳定性。根据以前的计算，二极铁和四极铁真空管道选用陶瓷环内衬时，对 BRing 全环宽带阻抗的贡献率超过了 70%[10]，可以预见的是，换用钛合金内衬后，二极铁和四极铁真空管道将仍然是全环宽带阻抗的重要组成部分。二极铁钛合金内衬的宽带阻抗及其减小措施已经被研究过[11]，但当时四极铁钛合金内衬尚未设计成型。四极铁真空管道的宽带阻抗有待仔细的计算和评估。

本文旨在借助 CST studio suite 软件[12]，用数值模拟

收稿日期：2024-04-08； **修改日期：**2024-04-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号 11825505）
作者简介：杜韶晖（1996–），男，甘肃定西人，博士研究生，从事加速器物理研究；E-mail: dushaohui@impcas.ac.cn
通信作者：E-mail: yangjch@impcas.ac.cn

的方法计算 BRing 四极铁钛合金内衬真空管道引入的宽带阻抗，并验证四极铁钛合金内衬真空管道选用的阻抗减小措施的有效性，最后评估 BRing 二极铁和四极铁真空管道装载钛合金内衬后对束流横向模耦合不稳定性产生的影响。

1　模型设置与计算方法

表 1　BRing 各规格四极铁真空管道的长度统计

规格	名称	总长度 (m)	占全环总长的比例
规格 1	八边形	42.5	7.5%
规格 2	跑道型	66.9	11.8%
规格 3	圆形 ϕ161	20.5	3.6%
规格 4	圆形 ϕ244	5.6	1%
规格 5	特殊引出	1.8	0.3%
	总计	137.3	24.1%

BRing 共有 4 种形状 5 种规格的四极铁真空管道，其总长度接近全环周长的 1/4，如表1所示。对应 5 种规格的四极铁钛合金内衬的结构如图1所示。钛合金环的纵向厚度为 6 mm, 每 11 或 12 个环连成一个内衬件 (除管道端口处部分内衬件较短外)，相邻钛合金环的间距设置为 13 或 14 mm，保证沿管道纵向均匀放置。五种规格的钛合金内衬，除第五种规格左右不对称外，其余规格均上下、左右都对称。计算阻抗时，我们会将前四种规格和第五种规格钛合金内衬的结果分开处理。

图1和图2分别是四极铁钛合金内衬阻抗减小前、减小后的结构示意图，可以观察到相对于图1, 图2中每一种四极铁钛合金内衬的上下内表面都添加了边缘呈锯齿状的导体板[1]，这便是四极铁钛合金内衬用于减小阻抗的设计，实际上是沿用了二极铁钛合金内衬的阻抗减小方案[11]。内衬件上下内表面的导体板可以为感应电荷提供通路以减小阻抗。板边缘的锯齿是为了方便钛合金内衬的加工，对于阻抗影响不大。导体板的材料与钛合金内衬的材料相同，在用 3D 打印技术制造时可以与钛合金内衬一起成型。

$$W_{\parallel}(x,y,x_0,y_0,z)[V/C] = -\frac{1}{q_0 q}\int_0^L F_{\parallel}(x,y,s,x_0,y_0,z)\,\mathrm{d}s$$
$$W_{x,y}(x,y,x_0,y_0,z)[V/C] = -\frac{1}{q_0 q}\int_0^L F_{x,y}(x,y,s,x_0,y_0,z)\,\mathrm{d}s \tag{1}$$

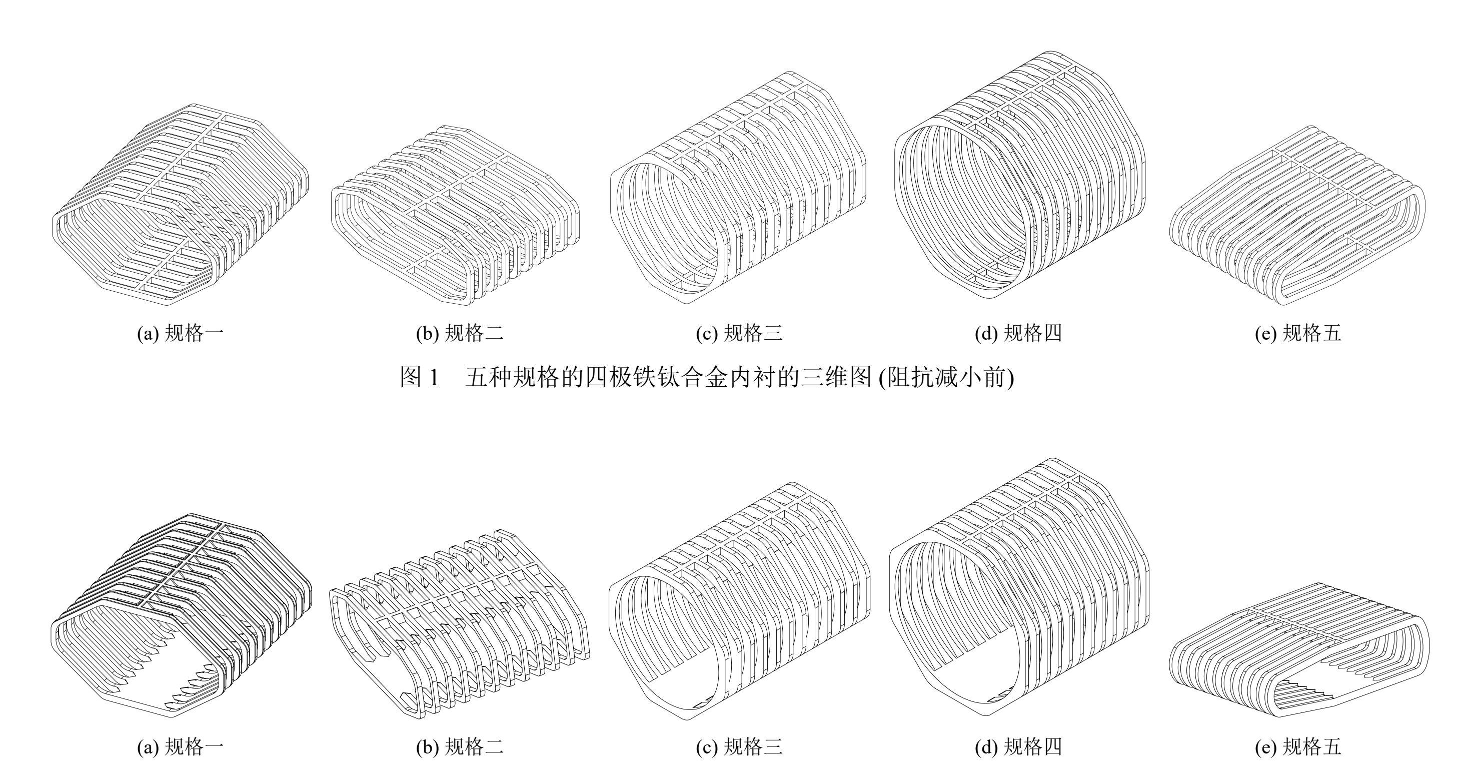
加速器元件的纵向和横向阻抗可以展开为源束团和检验电荷的路径相对于元件几何轴线的位置偏移 (x, y, x_0, y_0) 的幂级数，纵向阻抗中 0 阶分量占主导地位，横向阻抗中 1 阶分量占主导地位，横向阻抗 1 阶分量中，二极项 $Z_{x,y}^{driv}$ 占主导地位[10]，因此我们只研究纵向阻抗 0 阶分量和横向阻抗 1 阶分量的二极项。下文中出现的纵向阻抗即指其 0 阶分量，横向阻抗即指其横向阻抗 1 阶分量的二极项。

$$Z_x(\omega) = A_x(\omega) + Z_x^{driv}(\omega)x_0 + Z_x^{det}(\omega)x$$
$$Z_y(\omega) = A_y(\omega) + Z_y^{driv}(\omega)y_0 + Z_y^{det}(\omega)y \tag{2}$$

将含钛合金内衬的四极铁真空管道的三维模型导入 CST studio suite(除去掉两侧法兰外不做任何简化)，其束流耦合阻抗可直接用粒子工作室的尾场模块模拟得到，也可以在微波工作室中为结构添加导线和端口，通过模拟 S 参数间接得到。尾场法的准确性受制于网格收敛性和纳入计算的尾场长度的有限性。传输线法的准确性则会受到导线直径，导线间距，等长比较件等因素的影响，但总是可以采用自适应网格保证其网格收敛性，且不存在尾场需要在有限长度截断的问题。我们采用传输线法进行模拟，同时也用尾场法的结果做相互验证。

钛合金内衬的材料为 Ti-6Al-4V，其材料参数来自文献[13]，真空管道的材料为不锈钢 316L。模型的背景材料设置为 PEC，真空管道侧面的边界条件均设为 Et=0，纵向两端口边界条件设为 Open。传输线法测纵向阻抗是在结构两端加上波导端口 (Waveguide Port) 作为激励源，两波导端口之间沿束流路径设置一根同轴导线将两端口连接起来，中间不能形成断路 (同轴线法)。导线材料一般设为 PEC，导线不能过粗，过粗会导致同轴线与模型形成的同轴传输结构的特征阻抗过小，造成结果不准确，导线的半径要保证远小于待测件的孔径；导线也不能过细，过细则需要更多的网格和模拟时间，且会影响信噪比[14]。对于前四种规格的内衬我们选择的导线半径为 1 mm。对于第五种规格内衬我们选择导线半径为 0.2 mm。由于 HIAF-BRing 的束团长度超过 10 m，因此同轴线法的频率计算范围设为 DC–500 MHz[15]。在尾场模拟中设置高斯束团长度的标准差为 200 mm，纳入计算的尾场

[1]图2中的结构都已经进行过涡流效应的模拟，其涡流均在可接受范围内



(a) 规格一　(b) 规格二　(c) 规格三　(d) 规格四　(e) 规格五

图 1　五种规格的四极铁钛合金内衬的三维图 (阻抗减小前)

(a) 规格一　(b) 规格二　(c) 规格三　(d) 规格四　(e) 规格五

图 2　五种规格的四极铁钛合金内衬的三维图 (阻抗减小后)

长度设为 15 m, 并选择 cos^2 filtering 使数据更平滑[2]。

以装载钛合金内衬的四极铁真空室作为待测件 DUT，以不装载钛合金内衬的四极铁真空室作为参考件 REF。DUT 与 REF 的网格必须大致相同，否则会影响等长比较的效果，引入较大误差。分别模拟待测件和等长比较件的 S_{21} 参数，选用基于专家系统的自适应网格保证 S_{21} 参数最后收敛，然后将得到的两端口 S_{21} 参数的幅值 (magnitude) 和相位 (phase) 代入阻抗计算公式 (3) 即可得到待测件的纵向阻抗，其中 Z_c 为导线与参考件形成的同轴传输结构的特征阻抗，可在模拟中得到。另外注意相位 (phase) 会在接近 ∓180° 时跳变，造成过大的相位差，应该修正过来。

$$Z_0^{\parallel} = -2Z_c \ln(\frac{S_{21}^{DUT}}{S_{21}^{REF}})$$
$$Re\{Z_0^{\parallel}\} = -2Z_c \ln(\frac{|S_{21}^{DUT}|}{|S_{21}^{REF}|})$$
$$Im\{Z_0^{\parallel}\} = -2Z_c(\phi_{S_{21}^{DUT}} - \phi_{S_{21}^{REF}}) \tag{3}$$

传输线法计算横向阻抗时，同样在结构两端设置端口，在束流路径的左右两侧或上下两侧等距设置平行双线，双线的电势 (potential) 分别设置 +/− 以形成差模双线 (即为差模双线法)，同样选用自适应网格模拟两端口的 S 参数。数据处理时先利用公式 (3) 计算出系统的纵向阻抗，再利用公式 (4) 即可得到横向阻抗，其中 c 为光速，Δ 为双线间的距离。需要注意的是双线距离不能过小，要求 Δ 应远大于导线直径，但 Δ 也不宜过大，过大会超出以上公式的有效范围。

$$Z_1^{\perp} = \frac{cZ_0^{\parallel}}{\omega\Delta^2} \tag{4}$$

用尾场法计算横向阻抗时，根据公式2, 可以得到计算横向 1 阶阻抗二极项的公式[16]：

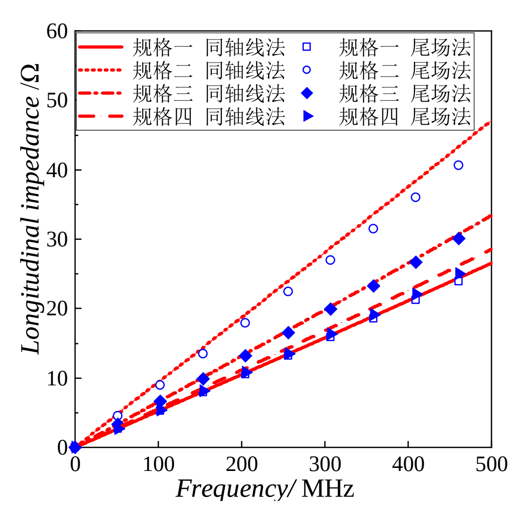
$$Z_x^{driv}(\omega) = \frac{Z_x(\omega) - A_x(\omega)}{x_0}|_{x=0}$$
$$Z_y^{driv}(\omega) = \frac{Z_y(\omega) - A_y(\omega)}{y_0}|_{y=0} \tag{5}$$

2　阻抗模拟结果

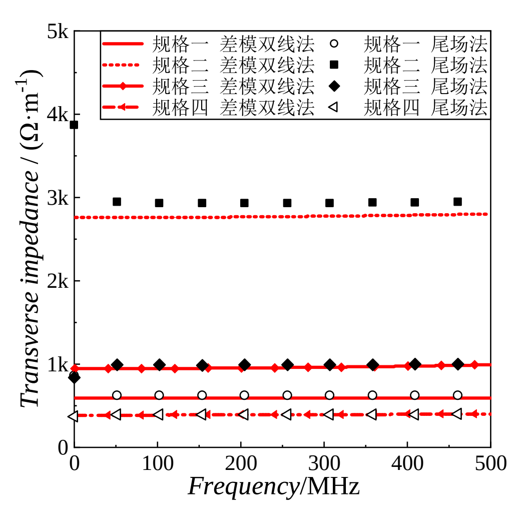
前四种规格的四极铁钛合金内衬真空管道的阻抗模拟结果如图4、图5、图6和图7所示。在 1 MHz 以上 500 MHz 以内，五种规格四极铁管道的纵向阻抗的实部均很小可以忽略，而纵向阻抗虚部与频率呈简单的正比例关系，且横向阻抗虚部在频谱上近似为水平线，因此在这一频段四极铁钛合金内衬真空管道主要引入宽带阻抗。

从图3来看，对于前四种规格的四极铁真空管道，尾场法和传输线法吻合得很好，说明计算结果关于网格和

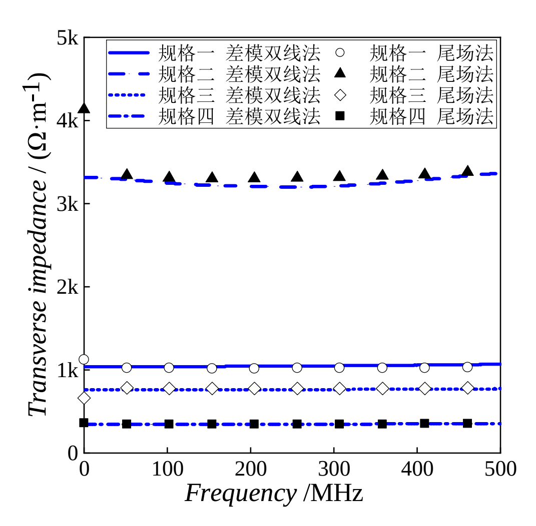
[2]这是 CST 尾场计算中的设置，用一个滤波函数在傅里叶变换之前与尾场函数相乘，以便生成平滑的频谱



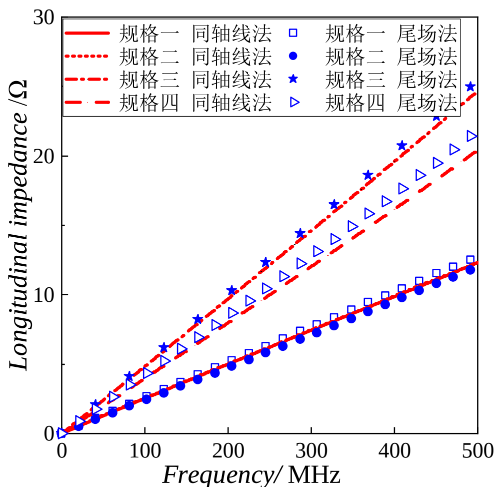
(a) 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小前纵向阻抗的同轴线法和尾场法模拟 (在线彩图)



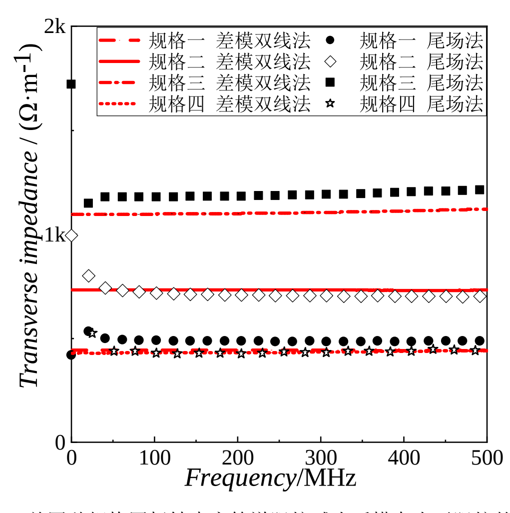
(b) 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小前横向水平阻抗的差模双线法模拟和尾场法模拟 (在线彩图)



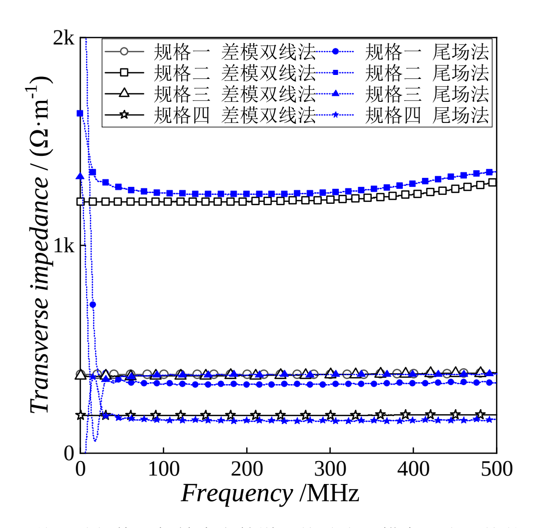
(c) 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小前横向垂直阻抗的差模双线法模拟和尾场法模拟 (在线彩图)



(d) 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小后纵向阻抗的同轴线法和尾场法模拟 (在线彩图)



(e) 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小后横向水平阻抗的差模双线法和尾场法模拟 (在线彩图)



(f) 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小后横向垂直阻抗的差模双线法和尾场法模拟 (在线彩图)

图 3　前四种规格四极铁钛合金内衬真空管道的尾场法模拟和传输线法模拟的对比

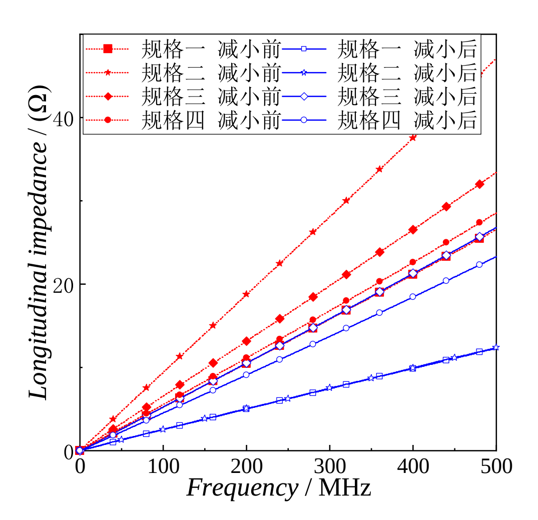


图 4 前四种规格四极铁真空管道纵向阻抗减小前后的对比

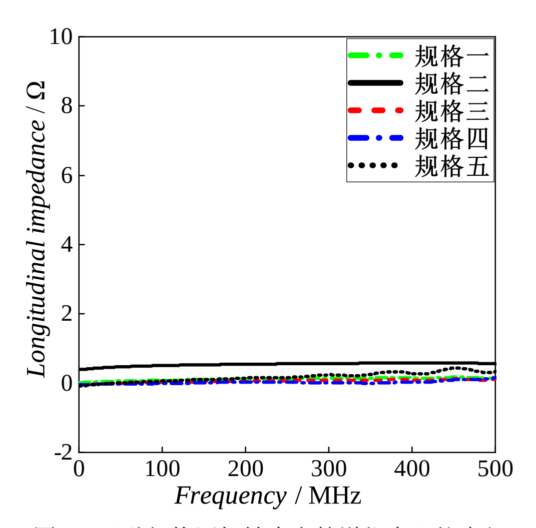


图 5 五种规格四极铁真空管道纵向阻抗实部

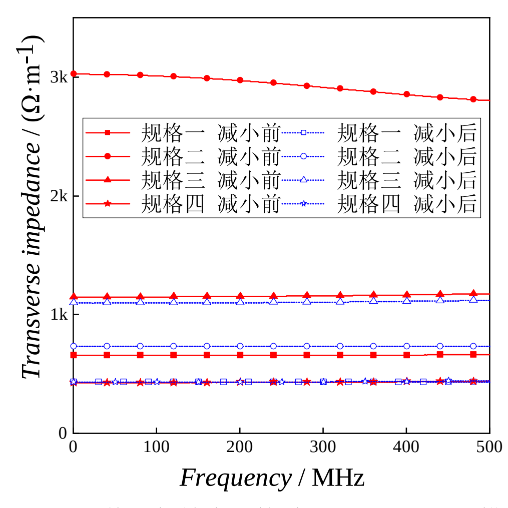


图 6 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小前后的横向水平阻抗对比 (在线彩图)

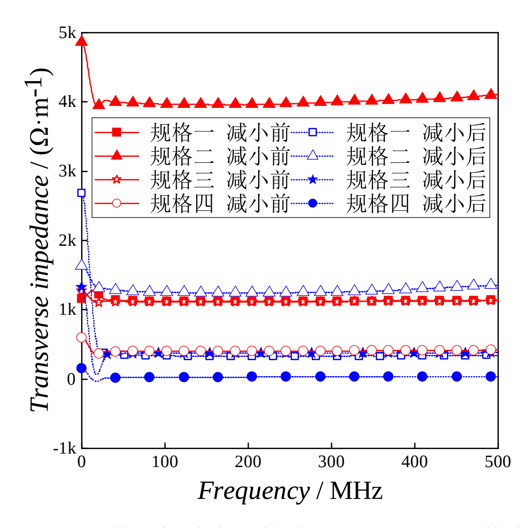


图 7 前四种规格四极铁真空管道阻抗减小前后的横向垂直阻抗对比 (在线彩图)

尾场长度已经收敛，且由于模型是未经改动直接导入的，可以认为模拟值比较接近真实值。第五种规格四极铁真空管道的纵向阻抗和横向阻抗如图8和图9所示，对于第五种规格的四极铁钛合金内衬真空管道，尾场法计算的纵向阻抗与同轴线法计算的纵向阻抗接近但是稍小一点，尾场法计算的横向阻抗也与差模双线法的结果接近但稍小一点。文献[17] 中提出，对于不对称结构，其纵向阻抗同样可以用同轴线法来模拟，计算公式3也同样适用。其横向阻抗 1 阶分量的二极项也同样可以用差模双线法和公式4来计算。从结果来看，对于不对称结构，传输线法能给出与尾场法接近的结果。

从阻抗减小前后的模拟结果对比来看，钛合金内衬内表面加板之后，五种规格四极铁钛合金内衬管道的纵向阻抗和横向阻抗都有所减小 (除第四种规格四极铁真空管道的横向水平阻抗变化不大外)，这说明这一阻抗减小措施也适用于四极铁真空管道。各种规格四极铁管道在阻抗减小前后的横向阻抗值如表2所示。已知在 0–500 MHz 频段内，二极铁阻抗减小前横向阻抗虚部分别为 −700 Ω/m(水平) 和 −1000 Ω/m(垂直)，阻抗减小后横向阻抗虚部分别为 −250 Ω/m(水平) 和 −250 Ω/m(垂直)[11]。结合这些数据，我们可以计算出二极铁和四极铁钛合金内衬真空管道在阻抗减小前后对应的全环横向阻抗，如图10和图11所示。在低频段 (10—10^5 Hz)BRing 全环阻抗的主要成分是电阻壁阻抗，在高频段 (10^5 Hz 以上)，宽带阻抗才成为 BRing 全环阻抗的主要成分。在 10^6—5×10^8 Hz 内，钛合金内衬真空管道阻抗减小前，BRing 全环横向宽带阻抗虚部约为 0.70 $M\Omega/m$(水平) 和 0.82 $M\Omega/m$(垂直)，钛合金内衬真空管道阻抗减小后，BRing 全环横向宽带阻抗虚部约为 0.33 $M\Omega/m$(水平) 和 0.43 $M\Omega/m$(垂直)。

对强流加速器，束流流强或全环宽带阻抗超过阈值都会引发横向模耦合不稳定性。我们将全环阻抗数据代

表 2　单位长度的各种规格四极铁钛合金内衬真空管道对应的横向阻抗 1 阶分量的二极项　Ω/m

规格	八边形		跑道形		圆形 $\phi161$		圆形 $\phi244$		特殊引出	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
减小前	$-700i$	$-1200i$	$-3000i$	$-4000i$	$-1100i$	$-1100i$	$-450i$	$-400i$	$-6000i$	$-7000i$
减小后	$-450i$	$-350i$	$-750i$	$-1300i$	$-1100i$	$-400i$	$-450i$	$-100i$	$-1200i$	$-1800i$

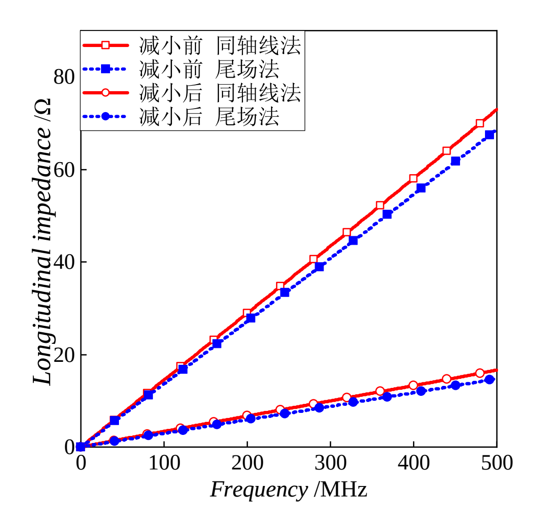


图 8　第五种规格四极铁真空管道阻抗减小前后的纵向阻抗对比 (在线彩图)

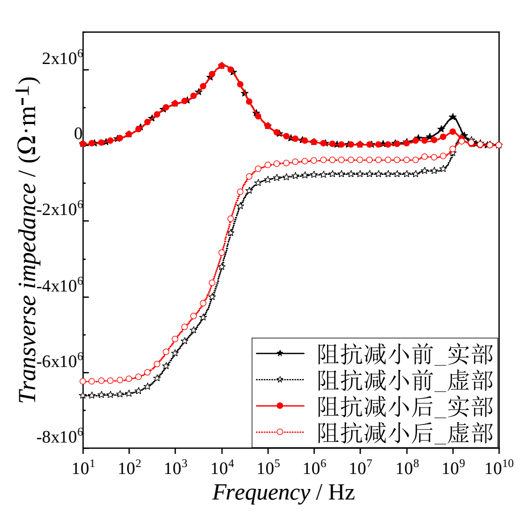


图 10　钛合金内衬阻抗减小前后 BRing 全环横向水平阻抗的对比 (在线彩图)

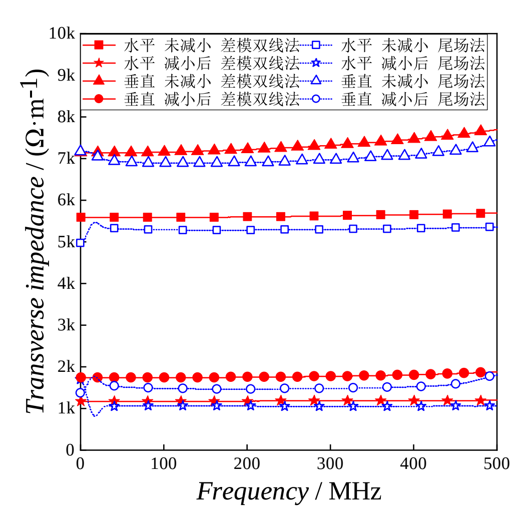


图 9　第五种规格四极铁真空管道阻抗减小前后的横向阻抗对比 (在线彩图)

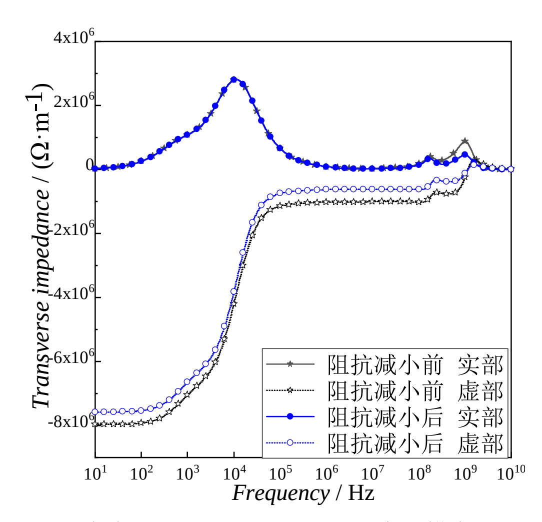


图 11　钛合金内衬阻抗减小前后 BRing 全环横向垂直阻抗的对比 (在线彩图)

入 CERN 开发的 Vlasov 模式求解器 DELPHI 中[18]，计算单个 $^{78}Kr^{19+}$ 束团在纵向振荡频率最低状态 (最容易发生横向模耦合不稳定性的状态) 下的模式频率移动。计算中使单个 $^{78}Kr^{19+}$ 束团的粒子数的值从 0 增加到 6×10^{11}，共 200 组流强值，来得到模式频率移动和流强的关系。Kr 束束团 RMS 长度设为 30 m，动能设为 1700 Mev/u，BRing 的临界能量 γ_t 设为 7.63507，纵向工作点设为 3.24×10^{-3} 并假设 BRing 的色品已经校正到 0。从图12可以看出，在二极铁和四极铁钛合金内衬真空管道阻抗减小前，当单束团粒子数大约在 2.7×10^{11} 时，方位角 0 模的部分径向模式与方位角模式-1 的部分径向模式发生耦合，即此时会发生横向模耦合不稳定性。即钛合金内衬真空管道阻抗减小前 Kr 束流强的阈值在 2.7×10^{11} ppp 左右，低于 BRing 对 Kr 束的设计流强 3×10^{11} ppp。在二极铁和

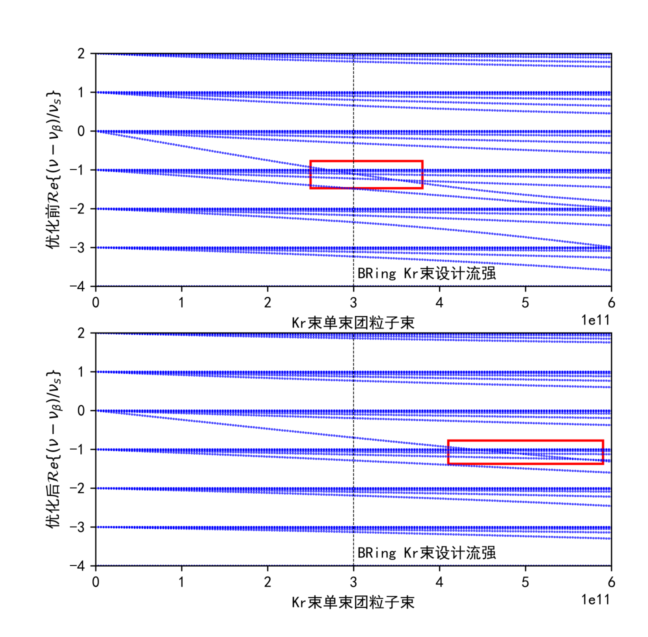


图 12　钛合金内衬内衬阻抗减小前后 BRing 束流不稳定性对比 (在线彩图)

四极铁钛合金内衬真空管道阻抗减小后，直到单束团粒子数接近 4.4×10^{11}，方位角 0 模和方位角模式-1 的部分径向模式才会发生耦合。即钛合金内衬真空管道阻抗减小后 Kr 束单束团流强的阈值在 4.4×10^{11} *ppp* 左右，高于 BRing 对 Kr 束的设计流强。

结论

本文旨在计算 HIAF-BRing 上四极铁钛合金内衬真空管道的阻抗，并评估二极铁和四极铁真空管道使用钛合金内衬对全环横向模耦合不稳定性产生的影响。本文首先借助 CST studio suite 软件，使用两种不同的方法模拟了五种规格的四极铁钛合金内衬真空管道的阻抗，以确保模拟结果不受网格和尾场收敛性的影响。从模拟结果来看，四极铁钛合金内衬真空管道在沿用了与二极铁真空管道相同的阻抗减小措施后，阻抗也有了可观的减小。然后利用二极铁和四极铁钛合金内衬管道的阻抗计算全环阻抗，并在 DELPHI 中，计算了单个 $^{78}Kr^{19+}$ 束团的模式频率移动。结果发现，钛合金内衬阻抗减小前，Kr 束发生横向模耦合不稳定性的流强阈值在 2.7×10^{11} *ppp* 左右，低于 BRing 对 Kr 束的设计流强。阻抗减小后，Kr 束发生模耦合不稳定性的流强阈值会提升到 4.4×10^{11} *ppp* 左右。二极铁和四极铁钛合金内衬真空管道的阻抗减小措施有效提升了 Kr 束在 BRing 上发生横向模耦合不稳定性的流强阈值，这将十分有利于 BRing 设计流强的实现。

从图10和图11中显示的全环阻抗结果来看，低频段电阻壁阻抗占主导地位，由于模拟工具的限制，我们只计算了装载钛合金内衬的超薄壁不锈钢管道引入的宽带阻抗 (1 MHz 以上)，但是对于低频段其引入的电阻壁阻抗尚未研究，下一步研究之后，就能够完整地揭示真空管道引入钛合金内衬对 BRing 束流动力学产生的影响。

参考文献

[1] ZHOU X, YANG J C. AAPPS Bulletin, 2022, 32: 1. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253387185.

[2] ZHAO H. High-intensity heavy ion accelerator facility (hiaf)[C/OL]//2016. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131766058.

[3] CHEN X, YANG J C, WEN XIA J, et al. Nucl Instr and Meth A, 2019. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:125834479.

[4] CHANG-DONG D, FU-SAN C, XIAN-JING S, et al. Chin Phys C, 2008, 32(S1): 71. http://hepnp.ihep.ac.cn/en/article/id/8719c293-8816-4acf-8ef2-bc6d6c63f57d.

[5] KOVALENKO A D, RUSSIA D. Full length superferric dipole and quadrupole prototype magnets for the sis100 at gsi: Status of the design and manufacturing*[C/OL]//2006. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:123789956.

[6] NIEDERMAYER U, BOINE-FRANKENHEIM O, HAENICHEN L. Analytical and numerical calculations of beam pipe impedances at low frequencies with application to thin sis 100 pipe[C/OL]//2011. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55471468.

[7] LI C C, LUO C, LIU J, et al. Vacuum, 2020: 109898. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:228912578.

[8] ZHU G, WU J X, CHEN X, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67: 1702. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219501399.

[9] LUO C, MENG J, YANG J, et al. Vacuum, 2023. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265298577.

[10] Eddy Current and Coupling Impedance of Ceramic Rings-Loaded Thin-Walled Vacuum Chamber in the HIAF/BRing (in Chinese) (陈孝强. HIAF/BRing 超薄壁陶瓷内衬真空管道涡流及阻抗研究[D]. 中国科学院大学, 2021.)

[11] DU S, LIU J, ZHU G, et al. The Review of scientific instruments, 2023, 94 10. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264144211.

[12] [EB/OL]. 2024. https://www.3ds.com/zh/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/.

[13] [EB/OL]. 2024. https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641.

[14] HAHN H, PEDERSEN F. On coaxial wire measurements of the longitudinal coupling impedance[C/OL]//1978. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108263868.

[15] LIU J, YANG J C, XIA J W, et al. Physical Review Accelerators and Beams, 2018, 21(6).

[16] ZANNINI C, RUMOLO G, LI K S B. Effects of an asymmetric chamber on the beam coupling impedance[C/OL]//2012. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55534078.

[17] DAY H, CASPERS F, MÉTRAL E, et al. Simulations of coaxial wire measurements of the impedance of asymmetric structures[C/OL]//2011. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54902218.

[18] [EB/OL]. https://abpcomputing.web.cern.ch/codes/codes_pages/DELPHI/.

Research on broadband impedance of titanium alloy cage lined vacuum chamber for quadrupole magnet on HIAF-BRing

Shaohui Du[1,2], Jiancheng Yang[1,2], Jie Liu[1,2], Guangyu Zhu[1,2], Wenjun Xie[1,2], GuoDong Shen[1,2]

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. School of nuclear science and technology,University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Titanium alloy cage lined thin-wall stainless steel vacuum chamber has been proposed by IMP and will be installed on BRing of HIAF for many merits such as high structural strength, small aperture, applicability under extremely high vacuum enviroments, tolerable eddy current effect under fast ramping magnetic field and relatively lower cost than other vacuum chambers for magnet with fast changing field.Titanium alloy linings for vacuum chamber of dipole and quadrupole magnet on BRing will become important source of coupling impedance. Simulation based on wakefield solver and transient solver of CST studio suite has been undertaken to characterize the impedance of titanium alloy linings for vacuum chamber of quadrupole magnet.The Data was used to calculate transverse dipolar impedance of whole ring and mode shift of $^{78}Kr^{19+}$ bunch on BRing under different beam intensity by vlasove solver.Results show that horizontal and vertical dipolar impedance of whole ring has changed from 0.70 $M\Omega/m$(horizontal) and 0.82 $M\Omega/m(vertical)$ to 0.33 $M\Omega/m$(horizontal) and 0.43 $M\Omega/m$(vertical) while the beam intensity threshold of transverse mode coupling instability has been shifted from $2.7\times10^{11}ppp$ to $4.4\times10^{11}ppp$ after impedance mitigation on titanium alloy cage lined thin-wall stainless steel vacuum chamber.

Key words: BRing; vacuum chamber of quadrupole magnet; titanium alloy lining; coupling impedance; transverse mode coupling instability;

Received date: 08 Apr. 2024;　**Revised date:** 08 Apr. 2024
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11825505);
Corresponding author: Jiancheng Yang, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn